

· 仿真与评估 ·

随机振动仿真分析

王 强, 陈 明

(东北电子技术研究所, 辽宁 锦州 121000)

摘 要: 简述了随机振动产生的原因及通常设计、试验方法, 并在高斯分布及 Miner 理论的基础上提出了使用软件进行随机振动仿真分析的方法及过程. 通过某设备的具体仿真分析过程, 详细论述了随机振动边界条件的确定及使用软件仿真分析的具体方法, 并指出了仿真分析过程中需要注意的问题, 为此类仿真分析提供了可靠的实现方法.

关键词: 随机振动; 仿真

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2009)05-0077-04

Emulation and Analysis of Random Vibration

WANG Qiang, CHEN Ming

(Northeast Research Institute of Electronics Technology, Jinzhou 121000, China)

Abstract: The causation of random vibration is introduced, and the usual design and test methods were summarized. Based on Gaussian distribution and Miner theory, the simulating analysis method and process for random vibration were put forward. Through the process of emulating and analyzing certain equipments, the practical ways to determine the boundary conditions of random vibration and to make the simulation and analysis by software were described, the problem to which must be paid attention during the simulation and analysis was point out. It can be a reliable reality method for this kind of the simulation analysis.

Key words: random vibration; emulation

随机振动是设备设计时所需考虑的重要因素, 大部分的设备损坏都是因随机振动造成的疲劳损坏. 对此通常的设计方法是: 先进行设计, 设计完成后, 按照相关要求, 使用随机振动台进行试验. 若不能通过试验, 则重新更改设计、试验, 直到满足要求为止.

随着计算机技术及仿真技术的不断发展, 使用高性能计算机及相应的软件平台, 便能实现设备随机振动仿真分析. 相比传统的振动试验分析方法, 随机振动仿真分析具有以下优势: (1) 某些设备的尺寸、质量比较大, 而振动量级比较高, 无法在现有振动台上做相关试验或试验费用昂贵; (2) 在设备初期进行方案设计时, 便能通过仿真分析为设计提供可靠的设计依据, 确保研制一次成功, 节约周期和经费.

随着仿真分析技术的不断发展, 且凭借着自身

先天的优势, 随机振动仿真分析已经有替代实际随机振动试验的趋势.

使用 ANSYS 的随机振动仿真平台结合高斯分布及 Miner 理论来实现设备的随机振动仿真分析是一种比较容易实现的仿真分析方法. 通过这种仿真分析方法可以得出疲劳寿命等实际随机振动试验中所关心的关键指标.

1 设备随机振动仿真分析方法

随机振动, 通常由大气湍流引起抖振, 时间长、频域宽, 属于稳态宽幅随机振动. 从理论上讲, 虽然随机载荷作用下的结构可以很方便地用时域信号表达, 并可以进行相应的动应力计算. 但是在时域内,

通常需要非常长的信号记录来描述一个完整的随机载荷过程,对于这种情况,已经证明在时域中进行瞬态动力分析是非常困难和不必要的.对于这类问题,可以将随机载荷及响应信号用功率谱密度(PSD)函数分类,并将动态结构模拟成为一个线性传递函数,在频域内进行疲劳分析,大部分仿真分析都采用了频域分析方法.

下面介绍的随机振动仿真分析方法,是采用了 ANSYS 平台的随机振动仿真功能,并通过疲劳损伤验证理论计算来分析设备的随机振动情况,验证其是否满足设备相关振动要求.具体实现方法为:

(1)先使用随机振动仿真分析得出随机振动应力.由于其应力分布是服从高斯分布的,因此应力主要分布于 3 个区间:以平均频率 f_0 为中心, $P_1(f_0, \sigma_1)$ 分布概率为 68.3%, $P_2(f_0, \sigma_2)$ 分布概率为 27.1%, $P_3(f_0, \sigma_3)$ 分布概率为 4.3%, 3 个区间合计是 99.7%,其他区间的应力假定对设备无损伤.

(2)使用 Miner 线性累积理论做疲劳损伤验证:材料在各个应力下的疲劳损伤是独立进行的,并且总损伤可以线性累积起来,当累积的疲劳损伤超过产品的疲劳极限后即失效.

实际计算上,小于材料疲劳极限强度 σ_{-1} 的应力认为对材料不起损伤作用;凡是大于材料疲劳极限强度 σ_{-1} 的各个应力,每循环一次造成寿命损失,经 n_1, n_2, \dots, n_n 次循环后,累加起来,求其损伤率.当大于材料疲劳极限 σ_{-1} 的各级应力对材料的寿命损伤率之和大于等于 1 时,材料既发生疲劳破坏,即

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_n}{N_n} = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} \geq 1 \quad (1)$$

式中,大于材料疲劳极限 σ_{-1} 的各级应力对材料的寿命损伤率分别为

$$\frac{n_1}{N_1}, \frac{n_2}{N_2}, \dots, \frac{n_n}{N_n} \quad (2)$$

式中, N_1, N_2 为大于材料疲劳极限 σ_{-1} 的各级应力的对应寿命次数,其值为

$$N_i = N \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_i} \right)^m \quad (3)$$

式中, N 为材料极限疲劳次数; m 为材料常数; σ_i 为大于 σ_{-1} 的各级应力.

2 实例介绍

某设备,其底板材料和导向杆均为 45 号钢.随

机振动试验要求为: X、Y、Z 3 个方向,每个方向为 1 h;加速度功率谱见表 1.

表 1 加速度功率谱

$f/(Hz)$	20	34	200	1 200	2 000
$w/(g^2/Hz)$	0.04	0.04	0.23	0.23	0.13

(1)建立三维模型,由于随机振动仿真分析对装配关系有严格要求,因此,设备的三维模型必须按照设备的实际安装情况进行装配,保证装配关系的准确性,见图 1 所示.

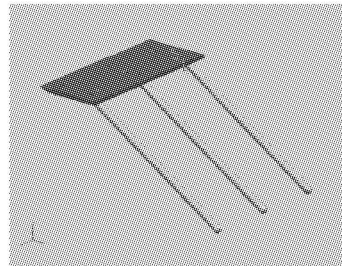


图 1 设备三维模型

(2)通过 WORKBENCH 将设备模型导入 ANSYS 并划分有限元单元,见图 2.

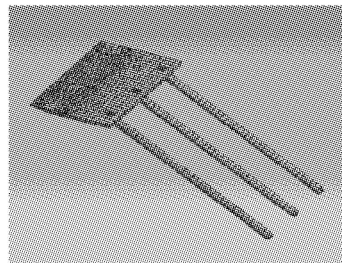


图 2 划分单元格后的模型

(3)定义好各部件及零件的材料属性,并检查接触关系.

(4)先进行静力状态下的分析(static structural).

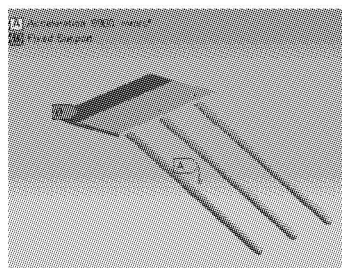


图 3 工况及载荷

随机振动中,不考虑外部载荷情况,只定义重力的方向及固定面即可,见图 3.

(5)进行模态分析求出给定范围内的各阶响应频率(modal). 该设备的频率范围从 20~2 000 Hz.

(6)进行随机振动分析(random vibration). 输入功率谱密度曲线,按照功率谱具体要求,输入加速度的功率谱密度曲线,见图 4.

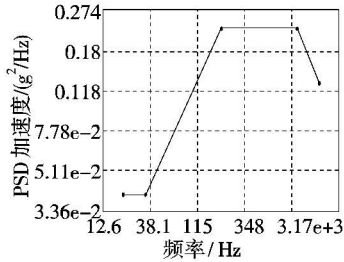


图 4 加速度功率谱曲线

(7)随机振动仿真分析. 随机振动分析时,不仅输入功率谱密度曲线,还要定义振动方向. 该设备需要在 3 个方向振动,每个方向 1 h. 因此需分别计算 3 个方向,结果见表 2 和图 5.

表 2 随机振动仿真结果

方向	频域应力		
	σ_1 /(MPa) (68.3%)	σ_2 /(MPa) (27.1%)	σ_3 /(MPa) (4.33%)
X	103.58	207.17	310.75
Y	37.389	74.779	112.17
Z	86.746	173.49	260.24

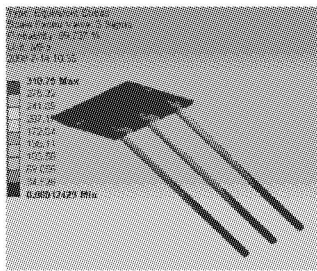


图 5 X 方向最大应力

(8)疲劳损伤验证

按照相关要求:本设备各方向试验 60 min, 振动平均频率 1 010 次.

按照高斯分布得出各个频域内对应应力循环的次数

$$P_1 \text{ 范围内: } n_1 = 0.683; f_i = 2.48 \times 10^6;$$

$$P_2 \text{ 范围内: } n_2 = 0.271; f_i = 0.98 \times 10^6;$$

$$P_3 \text{ 范围内: } n_3 = 0.0433; f_i = 0.16 \times 10^6.$$

按照材料 S-N 曲线及零件的加工情况,确定极限疲劳强度

$$\text{材料: } \sigma_{-1} = 240 \text{ MPa};$$

$$\text{底板: } \sigma_{-1} = 216.6 \text{ MPa};$$

$$\text{导向杆: } \sigma_{-1} = 144 \text{ MPa};$$

$$\text{极限疲劳次数: } N = 10^7;$$

$$\text{材料常数: } m = 9.$$

按照 Miner 线性累积理论,大于极限疲劳强度的损伤可线性累积,最大应力方向为 X 方向,最危险截面在导向杆上.

X 方向从 σ_2 开始累积

$$N_2 = N \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_2} \right)^m = 10^7 \left(\frac{144}{207.19} \right)^9 = 3.7 \times 10^5$$

$$N_3 = N \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_3} \right)^m = 10^7 \left(\frac{144}{310.75} \right)^9 = 0.98 \times 10^4$$

疲劳损伤为

$$\sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} = \left(\frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} \right) = \left(\frac{9.8}{3.7} + \frac{16}{0.98} \right) = 19 \geq 1$$

因此,该设备无法满足试验要求,需重新设计.

(9)新设计模型仿真分析

新设计模型如图 6. 仿真分析结果见表 3 及图 7.

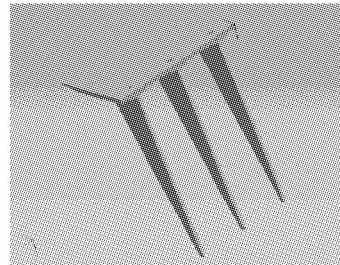


图 6 某设备三维模型

表 3 随机振动仿真结果

方向	频域应力		
	σ_1 /(MPa) (68.3%)	σ_2 /(MPa) (27.1%)	σ_3 /(MPa) (4.33%)
X	40.05	80.1	120.15
Y	46.432	92.864	139.3
Z	104.81	209.63	314.44

最大应力方向为 Z 方向,最危险截面在底板上,可得

$$N_3 = N \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_3} \right)^m = 10^7 \left(\frac{216.6}{314.44} \right)^9 = 3.49 \times 10^5$$

疲劳损伤为

$$\sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} = \left(\frac{n_3}{N_3} \right) = \left(\frac{1.6}{3.49} \right) = 0.458 \leq 1$$

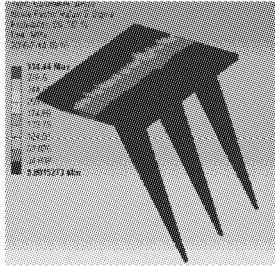


图 7 Z 方向最大应力
可以满足随机振动的相关要求。

3 结 束 语

通过使用软件仿真工具与随机振动疲劳理论计

(上接第 56 页)

从上述结果中可以看出,半像元合成图像的 PSNR 比双线性插值图像高出 0.2 dB.

峰值信噪比计算公式为

$$\text{PSNR} = 10 \log \frac{255^2 \times M \times N}{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} [O(i,j) - O'(i,j)]^2}$$

式中, $O(i,j)$ 、 $O'(i,j)$ 分别为原始图像及重建图像中第 (i,j) 个像素灰度值.

4 结 束 语

CCD 传感器的物理结构决定了其像元成像分辨率受像元尺寸限制.文中提出了在 CCD 器件内部集成 2 片 CCD,2 片 CCD 在线阵方向上错开半个像元,并减小 CCD 读出时间的半像元成像方法. CCD 在线阵方向上的错位及读出时间减半的等效结果是 2 个方向上采样间隔减小为原来的 1/2,即采样频率提高为原来的 2 倍,理论分辨率能达到原来的 2 倍,但 CCD 采集数据有重叠区域,因而合成图像实际分辨率低于低分辨率图像的 2 倍.实验结果显示:该方法可以有效减小 CCD 有限尺寸带来的混迭现象,且 PSNR 比双线性插值图像高 0.2 dB.

该方法利用读出时间减半来提高扫描方向上的采样频率,这对于光照强度不高的目标景物来说是不利的.但该方法对于光照强度足够的目标景物,可

算相结合的方法,可以比较准确地对设备随机振动进行仿真分析,并得出相应的结论.这样就能给设计者在设计前期提供充分的设计依据.另外,实例中的设备已通过试验验证,可以确定本仿真分析方法可行.

参考文献

- [1] 纽兰(英).随机振动与谱分析[M].北京:机械工业出版社,1980.
- [2] 孙志礼,何雪宏,何韶君.机械设计[M].北京:冶金工业出版社,1998:9-19.
- [3] 李超.基于功率谱密度的疲劳寿命估算[J].机械设计与研究,2005(4):6-9.
- [4] 周敏亮,陈忠明.飞机结构随机振动疲劳分析方法[J].飞机设计,2008(4):46-49.
- [5] 王长武,张幼安.随机疲劳分析在设备疲劳寿命中预测的应用[J].机械工程,2004,21(11月上):1906-1908.
- [6] 郭强岭,陈建明.喷气式飞机外挂可靠性试验振动条件探讨[J].航空兵器,2004(4):39-43.

以实时合成出高分辨率图像.为进一步提高合成图像分辨率,在不要求实时性的条件下,可以依据半像元成像数学模型来建立高分辨图像与低分辨率图像之间的关系,利用梯度下降或共轭梯度算法最优化求解,以合成高分辨率图像.

参考文献

- [1] 徐正平,翟林培,葛文奇,等.亚像元的 CCD 几何超分辨率方法[J].光学精密工程,2008,16(12):2447-2453.
- [2] Jae H Cha, Eddie Jacobs. Superresolution reconstruction and its impact on sensor performance [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5784:107-113.
- [3] 楚恒,朱维乐.基于 DCT 变换的图像融合方法研究[J].光学精密工程,2006,14(2):266-273.
- [4] 黄勇,陈琳.一种基于 SOFM 聚类的星图识别算法[J].光学精密工程,2004,12(6):346-351.
- [5] 潘梅森,荣秋生.基于 SOFM 神经网络的图像融合二值化方法[J].光学精密工程,2007,15(3):401-406.
- [6] 何永义,夏俊昇.工程图像的矢量化技术[J].光学精密工程,2002,10(8):374-378.
- [7] 王凌,张平,冯华君,等.用多次移位成像提高 CCD 成像分辨率的反演解析法[J].光电工程,2003,30(3):62-65.
- [8] 刘其涛,李金萍,张峻.用像元重叠采样提高 CCD 成像分辨率的方法[J].激光与红外,2005,35(3):210-213.
- [9] 胡燕,胡莘,王昱.半像元错位图像的超分辨率重建方法[J].测绘科学与工程,2004,24(1):24-29.